

基于路面平整度指标的农村公路变形类病害判别研究

王浩仰^{1,2}

(1. 中公高科养护科技股份有限公司, 北京市 100095; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京市 100088)

摘要:路面变形类病害影响路面安全性,在农村公路尤为关注。高效准确地判别路面变形类病害对于农村公路发现薄弱环节、制定路面养护计划有重要意义。该文提出一种基于路面平整度指标的沥青路面变形类病害判别方法,利用大量农村公路试验观测数据,选用3 m移动方差 LPV_3 和国际平整度指数 IRI 两种平整度指标,通过深入的数据分析,分别建立两种指标和变形类病害深度之间的模型,并对模型的准确性进行验证。模型能对农村公路路面变形类病害做出较为准确的定量判别,能够满足农村公路宏观管理的需要。

关键词:道路工程;农村公路;变形类病害;路面平整度; LPV_3

农村公路是保障农民群众生产生活的基本条件,是农业和农村发展的先导性、基础性设施,是社会主义新农村建设的重要支撑。党的十八大以来,习近平总书记十分关心农村公路发展,多次作出重要指示,要求建好、管好、护好、运营好农村公路。以习总书记重要指示为引领,为规范农村公路养护管理,交通运输部于2015年出台《农村公路养护管理办法》^[1],其中规定省级交通运输主管部门应制定符合本辖区实际的农村公路技术状况评定标准,县级交通运输主管部门和公路管理机构应当定期组织开展农村公路技术状况评定,路面技术状况评定宜采用自动化快速检测设备,应加快推进决策科学化进程。

安全畅通是农村公路的最重要要求,在路面技术状况评定时要充分考虑道路的使用功能和安全性,变形类病害(沉陷、拥包、坑槽等)是影响道路通行的主要病害^[2],建立其高效准确的判别方法,有利于引导管理部门和养护单位对路面病害隐患快速排查与治理,提升农村公路的安全通行能力。

1 基于路面平整度指标的路面变形类病害判别思路

目前路面损坏检测主要采用数字图像方法,基本实现了路面裂缝的自动化检测,对除裂缝外其他路面损坏类型的自动检测是今后道路路面检测发展的重点^[3]。目前基于3D图像识别的变形类病害检测技术

不仅成本高,而且技术应用尚不成熟,对于农村公路检测不具有适用性。

美国试验与材料协会(ASTM)定义道路的平整度(Traveled Surface Roughness)为路面表面相对于理想平面的竖向偏差。中国国家标准GBJ 124 88《道路工程术语标准》规定路面的平整度(Surface Evenness)为路表面纵向凹凸量的偏差值。国内外用于表示平整度的词语很多,在中国,道路工程中一般用“平整度”表述路面状况,而车辆工程中则常使用不平度一词^[4]。

国内外文献表明:平整度指标被广泛地应用于路面损坏的相关研究中,Prasad^[5]等通过研究发现,路面的平整度在一定程度上可以反映路面的性能状态和病害程度;Sandra等^[6]通过路面病害来预测平整度指标,发现坑洞等变形类病害与平整度有最高的相关性,裂缝类病害与平整度相关性最低。

基于以上分析,该文试图建立一种基于路面平整度指标的沥青路面变形类病害判别方法,通过建立平整度指标和沥青路面变形类病害关键参数之间的关系,采用平整度指标来判别变形类病害的位置和程度。

平整度指标选取了两种指标,一种是国际上广泛使用的国际平整度指数 IRI ,JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》^[7]也应用了该指标;另外一种选取了 LPV_3 (3 m Longitudinal Profile Variance),该指标在英国应用广泛,一方面用于评价路面平整度,研究表明移动方差类指标更能和司乘人员感受相关联^[8];另一方面用于计算综合性能指标 RCI (The SCANNER

Road Condition Index), *RCI* 指标主要包括平整度、车辙、裂缝及构造深度 4 部分, 评定单元为 10 m。英国自 2006 年使用 *RCI* 指标, 2007 年根据自身道路情况进行了改良, 并沿用至今。

SCANNER 对移动方差算法做了规定^[8]: 见式(1)~(6), 其中式(1)~(5)是式(6)所需要基本参数的具体算法。

$$m=\frac{\bar{L}}{l}$$

(1)

式中: \bar{L} 为移动平均长度; l 为输出间隔; m 为与移动平均长度相对应的高程点的数量, 四舍五入到最近的奇数, 例如对于 3 m 和 10 m 移动平均长度, 输出间隔为 0.1 m, 对应的数量为 31 和 101。

$$J=\frac{L}{l}$$

(2)

式中: L 为长度; J 为与长度 L 相对应的高程点的数量, 四舍五入到最近的奇数, 例如对于 3 m 和 10 m 移动平均长度, 输出间隔为 0.1 m, 对应的数量为 31 和 101。

$$\bar{Y}_k=\frac{1}{m}\sum_{j=i}^{j=i+m-1}Y_j$$

(3)

$$i=k-\frac{(m-1)}{2}$$

(4)

式中: \bar{Y}_k 为 k 点处的移动平均值; Y_j 为 j 点处的高程; k 为取值从 $(m+1)/2$ 到 $M-(m-1)/2$ 。

$$d_k=Y_k-\bar{Y}_k$$

(5)

式中: Y_k 为 k 点处的高程。

$$LPV_i=\frac{10^6}{J}\sum_{k=i}^{i+J-1}(d_k)^2$$

(6)

式中: LPV_i 为长度 L 范围内从第 i 点处开始的移动平均方差。

2 试验路段及数据

2.1 试验路段

研究所选试验路段分布在北京地区, 分别选取了一条乡道和村道, 试验路段的基本情况如下:

(1) T001: 乡道, 沥青路面, 共 2 000 m。该路段有较多数量的沉陷, 行驶质量较差[图 1(a)]。

(2) T002: 村道, 沥青路面, 共 2 000 m。该路段有较多数量的龟裂、坑槽以及沉陷, 行驶质量很差[图 1(b)]。



(a) T001 (b) T002

图 1 检测路线典型病害图像

2.2 试验方法

试验路段两种平整度数据(*IRI* 和 LPV_3)由 CiCS IV-L(农村公路路况检测系统)检测车道轮迹带得到, 检测设备获得了国家道路与桥梁工程检测设备计量站出具的平整度 *IRI* 校准证书(且处于有效期内), *IRI* 准确性验证方法不再赘述。 LPV_3 是英国 SCANNER 规范里规定的指标, 在中国尚未得到应用, 下文对 LPV_3 准确性验证方法进行详细介绍。

在试验路段的轮迹带纵断面测线上间隔 10 cm 做出清晰的测点标记, 采用精度为 0.01 mm 的数字水准仪分别测试 2 个试验路段各测点的原始纵断面高程, 然后分别进行 3 m 的滤波, 获得滤波后纵断面数据并计算纵断面方差 LPV_3 指标, 作为纵断面验证的参照数据。

CiCS IV-L 试验时在直线路段考虑了正常匀速、低速匀速(10 km/h)、变速 3 种试验条件, 其中匀速分别试验了 20、40、60、80 km/h 等不同速度的检测, 变速最大加(减)速度达 2 m/s², 每种试验条件及每种速度分别进行了 3 次重复试验。在弯道路段和不利行驶条件下(遇到减速带和严重的沉陷、坑槽病害), 为保证行驶安全, 可减速保持低速行驶。操作手在随车测试过程中, 对关注的病害(坑槽、沉陷和拥包)位置桩号进行记录。

试验的基本情况包括测试参数、验证方法及主要结论汇总如表 1 所示。以 T001 路段为例, 试验误差结果汇总如表 2 所示。

表 1 试验情况汇总(纵断面、3 m 滤波纵断面)

项目	纵断面高差	纵断面相	LPV_3 误差	LPV_3 误差
	(±2 mm)/%	关系数	(±0.6)/%	(±0.3)/%
验证标准	≥95	≥0.75	≥95	≥65
验证方法	参考数据验证			
测试结论	满足 SCANNER 要求			

表 2 试验误差结果汇总(T001)

试验 状态	速度 (减速度)	纵断面高差	纵断面相	LPV ₃ 误差/%	
		(±2 mm)	关系数	±0.6、	±0.3、
		≥95%占 比/%	≥0.75 占比/%	≥95%	≥65%
正常 匀速	20 km/h-1	99.65	0.91	100.0	90
	20 km/h-2	99.60	0.93	100.0	95
	20 km/h-3	99.75	0.93	100.0	100
	40 km/h-1	99.70	0.92	100.0	100
	40 km/h-2	99.45	0.91	100.0	95
	40 km/h-3	99.65	0.91	100.0	95
	80 km/h-1	99.30	0.88	100.0	100
	80 km/h-2	99.25	0.87	100.0	95
	80 km/h-3	99.50	0.90	100.0	95
	10 km/h-1	99.45	0.93	100.0	95
低速	10 km/h-2	99.55	0.93	100.0	95
	10 km/h-3	99.50	0.92	100.0	95
减速	1 m/s ² -1	99.20	0.88	95.0	95
	1 m/s ² -2	98.40	0.83	95.0	95
	1 m/s ² -3	99.15	0.86	100.0	90
	2 m/s ² -1	99.40	0.89	100.0	85
	2 m/s ² -2	99.65	0.91	100.0	100
	2 m/s ² -3	99.50	0.91	100.0	100
	3 m/s ² -1	99.65	0.93	100.0	95
	3 m/s ² -2	99.70	0.92	100.0	90
	3 m/s ² -3	99.65	0.92	100.0	100
	4 m/s ² -1	99.70	0.92	100.0	90
	4 m/s ² -2	99.45	0.91	100.0	100
	4 m/s ² -3	99.60	0.92	100.0	90

2.3 试验数据

为了探索 LPV₃ 和 IRI 两种指标参数值与变形类病害形状之间的关系,该文将病害进行行车方向二维平面上的简化,如图 2 模拟图所示。用参数深度 d 、长度 L 来描述病害的形状。

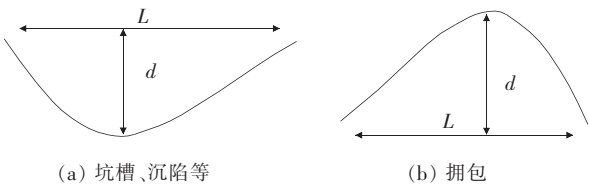


图 2 病害二维纵断面方向模拟图

试验总共收集了 26 组路面病害数据,包括坑槽、沉陷和拥包。病害深度 d 和长度 L 通过米尺进行准确测量。研究以 10 m 为单元输出 LPV₃ 值,即 10 m 范围内所有点 LPV₃ 值的平均值;国际平整度指数 IRI 的输出单元也是 10 m。

LPV₃ 和 IRI 各指标数值和病害形状参数对应如表 3 所示。

表 3 试验数据分析

序号	病害深度/cm	病害宽度/m	病害类型	LPV ₃ /mm ²	IRI/(m·km ⁻¹)
1	2.0	0.15	坑槽	17.2	11.0
2	1.5	0.15	坑槽	10.2	7.8
3	4.0	0.50	坑槽	34.2	12.4
4	1.5	0.20	坑槽	10.6	6.5
5	4.0	0.15	坑槽	39.4	12.9
6	2.0	0.15	坑槽	20.7	8.9
7	5.0	1.00	沉陷	82.3	25.4
8	2.0	0.20	坑槽	12.7	9.7
9	2.5	0.20	坑槽	25.7	11.9
10	1.7	4.00	沉陷	12.0	8.7
11	1.5	2.00	沉陷	11.3	7.1
12	5.0	5.00	沉陷	34.0	16.4
13	7.0	3.00	沉陷	71.2	18.6
14	2.0	0.30	坑槽	19.2	10.3
15	3.0	0.10	坑槽	26.9	10.5
16	4.5	3.00	拥包	32.8	13.9
17	1.0	1.00	沉陷	8.1	6.8
18	2.0	4.00	沉陷	10.1	8.8
19	1.5	3.00	沉陷	12.1	4.3
20	3.0	2.50	沉陷	29.2	11.0
21	2.0	3.00	拥包	12.8	8.8
22	2.0	3.00	沉陷	13.2	8.4
23	2.0	2.00	拥包	13.1	7.4
24	8.0	3.00	沉陷	46.0	15.9
25	13.0	7.00	沉陷	78.2	20.9
26	3.0	2.00	拥包	26.1	12.2

3 数据分析及规律研究

3.1 平整度指标与深度 d 、长度 L 的相关性关系研究

(1) LPV₃ 与深度 d 、长度 L 的相关性关系

运用 SPSS 软件分别分析 LPV₃ 与深度 d 、长度

L 的相关性关系,该文选用 Pearson 和 Kendall 相关两种方法,结果如表 4、5 所示。

表 4 LPV_3 与深度 d 相关性结果

项目	Kendall 的 tau_b(LPV_3)			Spearman 的 rho(LPV_3)		
	相关系数	Sig. (双侧)	N	相关系数	Sig. (双侧)	N
LPV_3	1.000	—	28	1.000	—	28
深度 d	0.821**	0.000	28	0.931**	0.000	28

注 ** 表示在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的。

由表 4 可以看出:两种方法得到的相关系数分别为 0.821 和 0.931,显著性 $p=0.000<0.01$,有统计学意义,两种方法都表明置信度为 0.01 时, LPV_3 与深度 d 相关性显著。

表 5 LPV_3 与长度 L 相关性结果

项目	Kendall 的 tau_b(LPV_3)			Spearman 的 rho(LPV_3)		
	相关系数	Sig. (双侧)	N	相关系数	Sig. (双侧)	N
LPV_3	1.000	—	28	1.000	—	28
长度 L	0.009	0.952	28	-0.026	0.897	28

由表 5 可以看出:两种方法得到的相关系数分别为 0.009 和 -0.026,显著性 $p>0.01$,两种方法都表明 LPV_3 与长度 L 无相关性。

(2) IRI 与深度 d 、长度 L 的相关性关系

运用同样的方法,软件输出结果不再赘述,结论如下: IRI 与深度 d 相关性显著,与长度 L 无相关性。

3.2 LPV_3 、 IRI 与深度 d 回归模型

结合上节分析结果,分别对 LPV_3 、 IRI 与深度 d 进行各种函数回归,尝试用幂函数、指数、对数 3 种模型形式,得到的回归公式及相关系数如表 6 所示。由表 6 发现两个指标均是幂函数回归的相关系数最好, R^2 分别为 0.87、0.77,并且 LPV_3 与深度 d 拟合效果好于 IRI 。

JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》^[7]中对沥青路面坑槽、沉陷和拥包等病害类型不同程度划分有明确规定,病害轻重程度划分的关键参数是深度 d (表 7)。

结合表 7 中沥青路面坑槽、沉陷和拥包轻度和重度划分的分界值,可取深度 $d=1\text{ cm}$ 和 2.5 cm 作为变形类病害判别的两个分界值,根据 LPV_3 、 IRI 和深度 d 分别建立的回归模型,可计算得到对应深度处于

$1\sim 2.5\text{ cm}$,大于 2.5 cm 两类变形类病害的 LPV_3 和 IRI 的判别阈值(表 8)。

表 6 回归模型汇总

指标	模型名称	模型形式	R^2
IRI	幂函数	$Y=5.97X^{0.57}$	0.77
	指数	$Y=7.2e^{0.12X}$	0.59
	对数	$Y=6.87\ln X+4.53$	0.75
LPV_3	幂函数	$Y=7.65X^{1.04}$	0.87
	指数	$Y=10.66e^{0.21X}$	0.68
	对数	$Y=30.86\ln X-3.57$	0.79

表 7 深度 d 取值范围

病害类型	d/cm	
	轻度	重度
坑槽	<2.5	≥ 2.5
沉陷	$[1,2.5]$	>2.5
拥包	$[1,2.5]$	>2.5

表 8 阈值

病害程度	深度 d/cm	$LPV_3/$ mm^2	$IRI/$ $(\text{m}\cdot\text{km}^{-1})$
轻度	$(1,2.5]$	$(7.7,19.8]$	$(6.0,10.1]$
重度	>2.5	>19.8	>10.1

4 模型性能验证

选取的验证路段为中部某省份 3 条县村道,路面类型为沥青路面,测试设备为 CiCS IV-L(农村公路路况检测系统),为了验证采用 LPV_3 和 IRI 模型的判别效果,进一步采用准确率和误判率两个指标,计算公式如式(7)、(8)所示:

$$r_h=\frac{N_1}{N_2}$$

(7)

$$r_f=\frac{N-N_1}{N}$$

(8)

式中: N_1 为指标大于阈值且病害判断准确的数量; N_2 为病害的数量; N 为指标大于阈值点的数量; r_h 为准确率; r_f 为误判率。

LPV_3 和 IRI 判断变形类病害(深度为 $1\sim 2.5\text{ cm}$)的准确率和误判率如表 9 所示, LPV_3 和 IRI 判断变形类病害(深度大于 2.5 cm)的准确率和误判率如表 10 所示。两类病害合并判断的准确率和误判率

如表 11 所示。

表 9 病害(深度 1~2.5 cm)结果

指标	N	N_2	N_1	准确率/%	误判率/%
LPV_3	23	22	21	95.5	8.7
IRI	20	22	19	86.4	5.0

表 10 病害(深度>2.5 cm)结果

指标	N	N_2	N_1	准确率/%	误判率/%
LPV_3	12	15	12	80.0	0
IRI	14	15	12	80.0	14.3

表 11 汇总结果

指标	N	N_2	N_1	准确率/%	误判率/%
LPV_3	35	37	33	89.2	5.7
IRI	34	37	31	83.8	8.8

对于深度分布在 1~2.5 cm 的变形类病害, LPV_3 和 IRI 指标判别的准确率分别为 95.5% 和 86.4%, 误判率分别为 8.7% 和 5%; LPV_3 准确率比 IRI 高 9.1%, 误判率比 IRI 高 3.7%。对于深度>2.5 cm 的变形类病害, LPV_3 和 IRI 指标判别的准确率一样, 但 IRI 误判率显著高于 LPV_3 , LPV_3 误判率为 0。

两种分布范围病害合并分析, LPV_3 准确率为 89.2%, 高于 IRI ; 误判率为 5.7%, 低于 IRI 。

5 结论与建议

(1) 无论是 LPV_3 和 IRI , 都与变形类病害深度 d 相关性显著, 基于此, 分别建立了 LPV_3 和 IRI 与

变形类病害深度 d 的回归模型, 得到了判断变形类病害的两种平整度指标阈值。

(2) 从验证结果来看, LPV_3 和 IRI 准确率都很高(大于 80%), 误判率较低(小于 10%), 由此可得到基于路面平整度指标判断农村公路沥青路面变形类病害的位置和程度方法可行。

(3) 平整度指标 LPV_3 的应用效果好于 IRI 。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 农村公路养护管理办法[Z], 2015.

[2] Yang G, Wang H, Pan Y, et al. Research on Application of the Rural Road Performance Assessment Method in Jiangsu Province [J]. Road Materials & Pavement Design, 2017, 18(suppl 3): 76-87.

[3] 马建, 赵祥模, 贺拴海, 等. 路面检测技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 121-137.

[4] 王大为, 王宠惠, STEINAUER Bernhard, et al. 德国不限速高速公路路面平整度评价方法综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 105-113, 129.

[5] Prasad J R, Kanuganti, Shalini, Bhanegaonkar, Pooja N, et al. Development of Relationship between Roughness (IRI) and Visible Surface Distresses: A Study on PMG-SY Roads[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 104(3): 322-331.

[6] Sandra A K, Sarkar, Ashoke Kumar. Development of a Model for Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(8): 715-724.

[7] JTG 5210-2018 公路技术状况评定标准[S].

[8] Benbow E, Nesnas K and Wright A. Shape (Surface Form) of Local Roads [R]. Berkshire: TRL Published Project Report, PPR131, in Preparation, 2006.